高速列车转向架技术研究

赵明花，梁树林，宋春元
（长春轨道客车股份有限公司技术中心，长春 130062）

[摘要] 高速铁路运营对转向架技术提出了更高要求，为能设计出性能更优越的动车组转向架，调查了中国高速动车组的线路条件、动车组的车轮踏面磨耗情况，分析轮轨匹配关系；动力学分析中考虑了转臂节点、抗蛇行减振器、空气弹簧等部件的非线性特性，橡胶、减振器等减振元件高低温变化条件下车辆参数的变化，电机弹性悬挂方式等，在实际轮轨匹配关系基础上建立了车辆系统动力学模型。动力学系统仿真选择了最优悬挂参数，结合部件台架测试对悬挂元件进行了工程化设计；为掌握转向架服役周期内关键部件可靠性，对运用动车组转向架进行了大量的动应力测试，系统分析了中国无砟轨道条件下转向架主要承载区域载荷随车辆运营周期、不同气候条件、不同线路条件下的变化趋势，建立了中国高速列车载荷谱体系。通过结构、悬挂、传动、制动、焊接、降噪、轮轨等系统集成，形成高速列车转向架技术体系。

[关键词] 高速列车；轮轨关系；系统动力学；载荷谱；结构优化
[中图分类号] U238 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2015)04-0053-10

1 前言

我国从2004年开始引进国外高速列车技术，走“引进、消化、吸收、再创新”技术道路，实现了中国铁路的跨越式发展。与国外相比，我国高速线路全线采用无砟轨道，高速列车具有持续运行速度最高、持续运行时间最长、运行地域最广、运行密度最高、运量最大的特点。自2007年至今7年多运用时间，动车组转向架总体运用平稳性能良好，但在长期服役性能跟踪研究过程中也反映出一些个别区段轮轨匹配不良导致动力学性能下降，在满足30年使用寿命的情况下，局部结构强度裕量不足的问题。

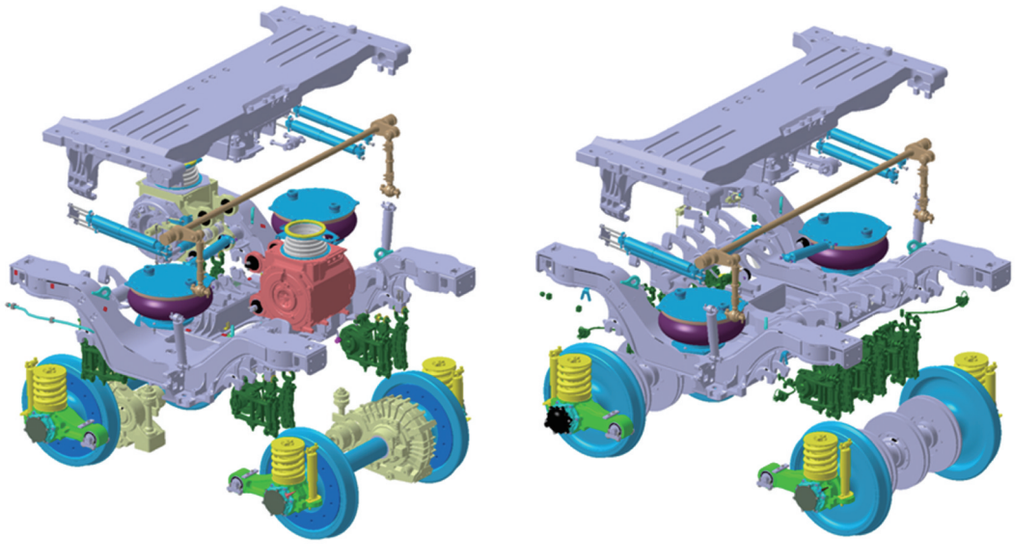
在引进、消化、吸收的基础上，结合动车组运用的大量数据，对转向架系统关键技术深入研究，完全把握，通过正向设计方法，自主开发适合我国高速运营的高速转向架。

2 高速转向架结构模式研究

转向架起承载、导向、减振、牵引、制动等基本功能，对于高速列车来说转向架性能既要有高速稳定性又要提供优良的平稳舒适性，在满足安全性前提下还应具有高可靠性，降低整个寿命周期内的成本，同时为便于维修，部件设计过程中考虑更换频率较高部件现场容易拆换。

世界各国的高速转向架为了实现高速的基本功能，基本结构包括：轮对及定位装置、一系悬挂系统、构架、二系悬挂系统、中央牵引装置、动力牵引系统等。动、拖车结构示意图见图1。

[收稿日期] 2014-12-20
[作者简介] 赵明花，1964年出生，女，吉林舒兰市人，教授级高级工程师，研究方向为机车车辆；E-mail：zhaominghua@cccar.com.cn

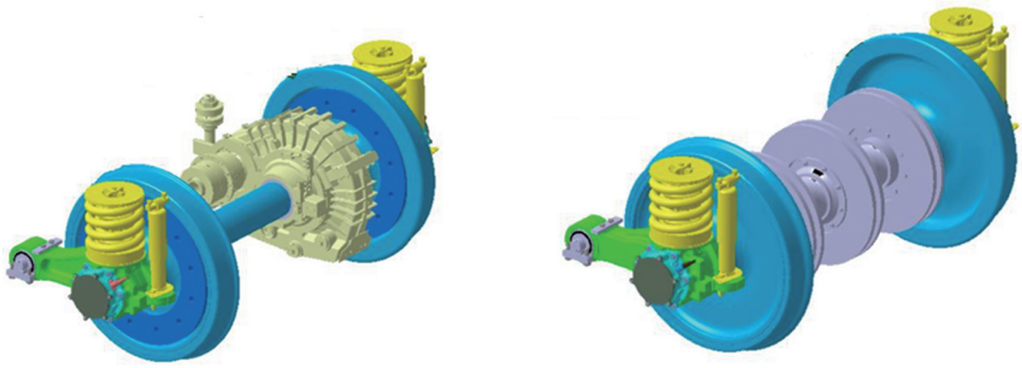


(a) (b)

图1　动、拖车结构示意图

Fig. 1　Motor, trailer bogie structure sketch map

1)轮对轴箱装置主要由车轮、车轴、轴箱、轴承、齿轮箱及联轴节等组成。轮对(见图2)作为车辆与线路的系统界面,直接向钢轨传递重力,通过轮轨间的粘着产生牵引力或制动力,并通过车轮的回转实现车辆在钢轨上的运行(平移)。为减轻簧下质量和车轴状态监测一般采用空心车轴。轴承采用高速圆锥、圆柱型滚子轴承,轴箱采用分体式结构,便于轮对更换维修。动轮为可安装制动盘的直辐板结构,拖轮为S形辐板或直辐板,并装有降噪阻尼材料或降噪块。齿轮箱安装采用基本对称设计,箱体设计避免产生应力集中,通过箱体模态匹配计算,齿轮箱体等模态与部件模态、轨道激扰频率实现错频设计。一系定位装置为能将横向与垂向悬挂解耦,降低簧下重量,兼顾一系定位刚度在高速运行时的稳定性和曲线通过性能,采用转臂定位结构方式。



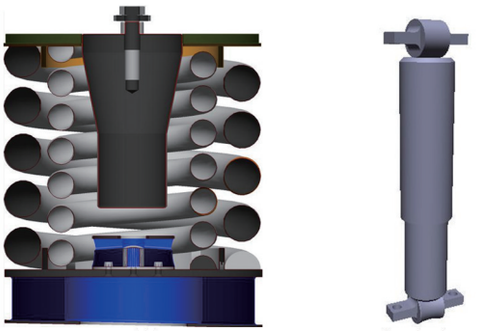
(a) (b)

图2　轮对及定位装置

Fig. 2　Wheel set and axle guidance device

2)一系悬挂弹簧采用钢弹簧与橡胶弹簧并联方式,橡胶叠层弹簧除了隔振线路激扰引起的高频振动,提高车辆乘坐舒适性外,当构架与轮对发生较大运行姿态变化时,通过叠层弹簧橡胶变形减小了钢弹簧因变形引起的额外受力;钢弹簧采用双圈弹簧组形式,内外弹簧的旋向相反;应急弹簧设置

合理的刚度曲线，在钢弹簧出现损坏等故障条件下提供足够的扰度，确保车辆低速运行的安全性（见图3）。



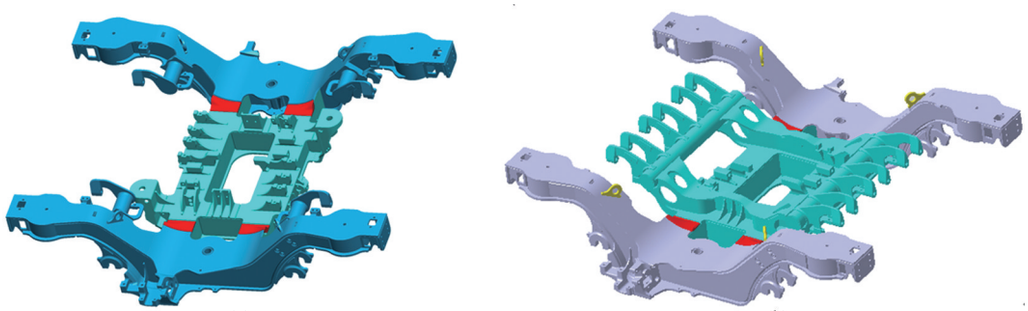
(a) 钢弹簧　　(b) 一系垂向减振器

图3　一系悬挂装置

Fig. 3　Primary suspension devices

3）构架结构（见图4）是转向架的主体骨架，既要提供足够的强度又要有各部位刚度协调，一般采用钢板焊接结构，主体呈H型结构，采用耐候型高强度焊接材料，构架采用模块化设计理念，动、拖采用相同的侧梁组成，侧梁组成采用最优化的变截面等强度设计；动、拖车构架横梁主体结构一致，为提高安装支座结构强度，提高构架抗弯去、扭矩能力，采用箱型焊接结构，根据其功能性焊接不同的安装座或其他部件。

4）二系悬挂系统（见图5）主要包括空气弹簧、横向减振器、抗蛇行减振器、抗侧滚扭杆等装置，从提高车辆乘坐舒适性角度考虑，采用大曲囊式空气弹簧结构，高柔性空气应急弹簧，确保空气弹簧无气状态下具有足够舒适性、安全余量，为防止单个空气弹簧故障时车体倾斜，减少曲线通过空簧充排气，空气弹簧采用两点控制方式；为确保车辆具有足够的抗侧滚能力，转向架需设有扭杆装置，扭杆通过枕梁上的两个扭杆座及两个扭杆衬套相连接，扭杆与转向架之间是通过可调连杆连接，便于转向架与车体落成后的调整；同时为减小车体、转向架横向晃动，通过动力学仿真确定了合理的抗蛇行、横向减振器参数。中央牵引装置能够提供足够纵向牵引刚度，平衡构架受力状态，将横向与纵向作用力解耦，中央牵引装采用了Z型拉杆结构。



(a)　　(b)

图4　构架结构示意图

Fig. 4　Bogie frame structure sketch map

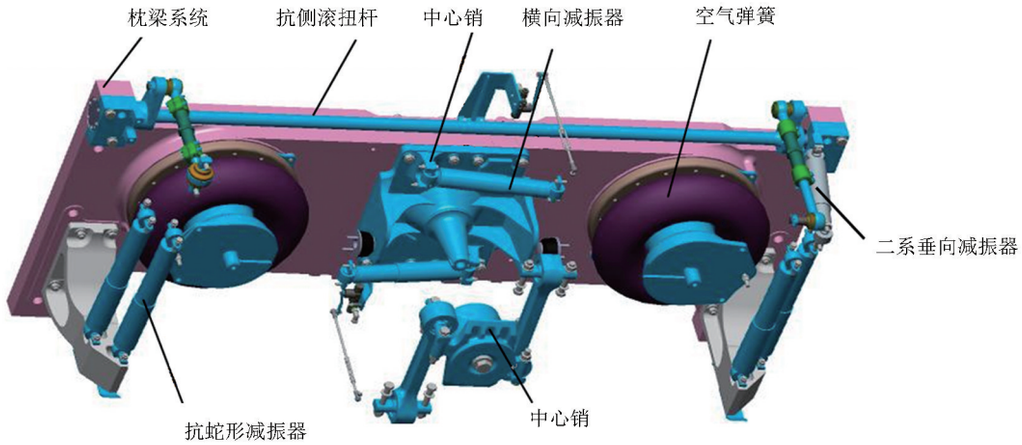


图5　二系悬挂装置

Fig. 5　Second suspension devices

5)动车组牵引电机的悬挂方式(见图6)主要有三种类型,即轴悬式、架悬式和体悬式,为降低轮轨作用力,提高车辆稳定性,电机采用了弹性悬挂方式,降低了簧下质量,同时降低了因轮轨匹配等效锥度升高引起的构架谐波振动的幅值。为减小电机与齿轮箱联轴节之间的变位差,吊挂点应接近小齿轮中心,采用了併装吊挂方式。

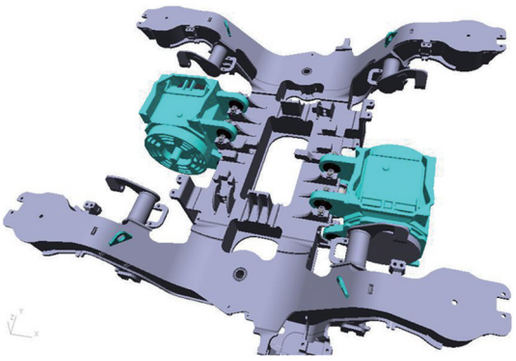


图6　电机弹性悬挂方式

Fig. 6　Motor elastic suspension

3　车辆系统动力学研究

车辆沿轨道运行时,由于轮轨之间的相互作用,产生各种垂向和横向作用力并引起车辆系统的各部件振动,振动响应不仅与线路状态有关,而且与车辆自身结构密切相关,专门对车辆系统的各种振动进行研究称为车辆系统动力学。随着列车运营速度的不断提高,对车辆运行安全性和乘坐舒适度提出了更高的要求。而转向架作为高速列车最重要的部件之一,其动力学性能的好坏直接决定了车辆运行的稳定性、平稳性和安全性。中国高速动车组已运行了7年,随着高速动车组的大量开行以及动车组运营里程的迅速增加,动车组的各种动力学问题不时出现,这些问题虽没有直接威胁到行车安全,但是给安全运营带来了隐患,有些问题还降低了乘坐质量,引起噪声或者异常振动,为查清产生问题的原因,对产生异常振动的动车组进行了振动状态、运行姿态的测试,并对线路情况进行了系统的调查,经多次解决问题,对动力学系统进行了深化研究,形成了高速动车组动力学性能的研究体系。

3.1　轮轨匹配研究

轮轨匹配(见图7)关系是影响车辆动力学性能的关键因素,因此车轮踏面外形设计十分重要。一般来说,车轮踏面设计主要考虑以下几方面的因素:a. 抗脱轨的安全性;b. 顺利通过道岔;c. 避免轮轨两点接触;d. 导向性能好;e. 轮轨磨耗小;f. 车辆动力学性能(包括稳定性、平稳性和曲线通过性能)好。要使设计出的踏面形状满足上述所有条件可能有一些难度,通常应根据各类车辆的具体运营特点采用能解决主要矛盾的踏面形状。

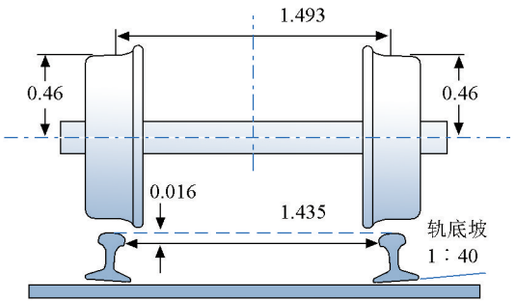


图7　轮轨匹配示意图(单位:m)

Fig. 7　Wheel rail matching map(unit:m)

我国高速动车组采用的轨廓形状为CH60,与UIC60E1比较接近,但武广高铁开通后运营动车组先后出现了构架横向加速度报警问题,经对报警路段进行线路测试发现,报警区段钢轨CH60打磨前的轨肩比较突出,与磨耗踏面匹配的等效锥度偏大,制定标准打磨钢轨外形为CH60N,与UIC60E2比较接近,通过车轮镟修、钢轨打磨改善局部线路轮轨匹配关系,能够明显抑制构架谐波振动;线路部门对异常路段实施打磨过程中可能产生过打磨情况,导致钢轨轨肩较低,与新镟修踏面匹配的等效锥度大幅降低,容易发生车体低频晃动,如满足高速动车组运行性能,轮轨匹配需做到精细调整,根据线路轨道参数的调查情况,为适应中国线路钢轨打磨前、打磨后、异常钢轨等线路现状,车轮踏面设计需要考虑新车状态与过渡打磨路段钢轨匹配下对车辆动力学的影响,车轮踏面磨耗状态与打磨前钢轨匹配下对车辆动力学的影响,兼顾动力学性能的同时还需考虑踏面的磨耗量。我国实测和欧洲标准轨廓外形分别如图8和图9所示。

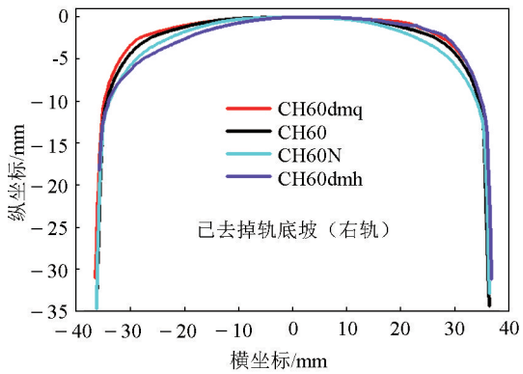


图8　我国实测轨廓外形

Fig. 8　China measurement rail shape

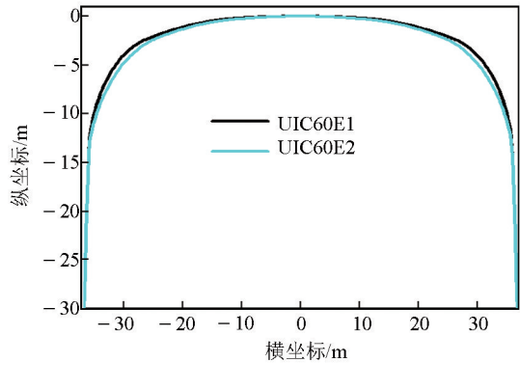


图9　欧洲标准轨廓外形

Fig. 9　Europe standard rail shape

动车组在不同线路、不同运行速度条件下踏面的磨耗形状存在较大差异，而踏面磨耗的差异对车辆动力学性能影响较大，对车辆目前既有高速动车组踏面磨耗量进行统计相差较小，大约每 1×10^5 km 磨耗 0.3 mm，但性能差异主要缘于磨耗状态，车辆以低于设计速度运行时，踏面磨耗位置偏向外侧，车辆以高速运行时，踏面磨耗位置偏向于内侧，而在有较少曲线和线路较好上运行时，踏面容易出现凹型磨耗，车轮踏面凹陷磨耗是指车轮在钢轨上长期地滚动接触，呈现出下凹形状的磨损形态，即踏面的中央部分会磨耗得低于踏面的外侧，如图10所示。

车轮踏面凹陷磨耗会严重恶化轮轨接触几何关系，增加踏面等效锥度，降低蛇行运动稳定性，影响旅客乘坐舒适度，引起噪声或异常振动，甚至还威胁到行车安全。

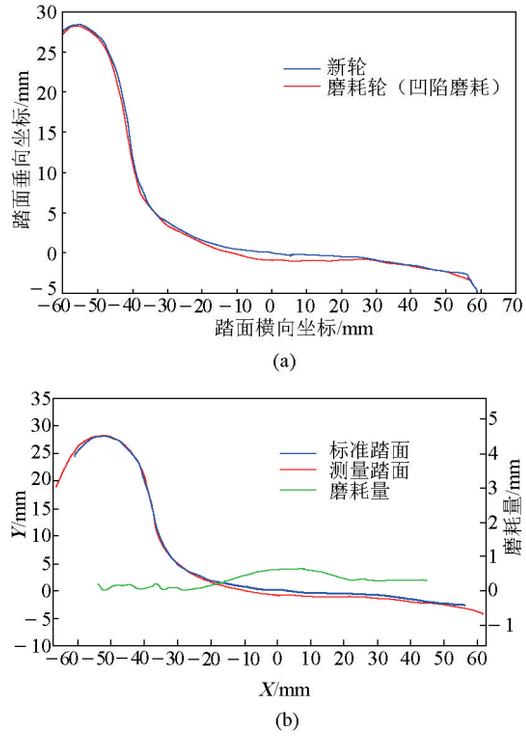


图10　踏面凹型磨耗情况

Fig. 10　Tread concave type wear

经过对运营动车组的多年服役跟踪，测试了随运行历程的变化的车轮踏面磨耗情况，同时对不同线路状态进行轨廓形状测量，踏面新轮和磨耗轮与不同轨廓匹配的等效锥度对比，发现等效锥度相差较大，假如新踏面与标准钢轨匹配时的等效锥度为0.18，与打磨钢轨 CH60N 匹配时等效锥度为0.1，与轨肩过度打磨钢轨 CH60dmh 匹配时等效锥度为0.04；磨耗踏面与标准钢轨匹配的等效锥度为0.35，而与轨肩突出钢轨 CH60dmq 匹配时等效锥度可达到0.6；对比如图11所示。

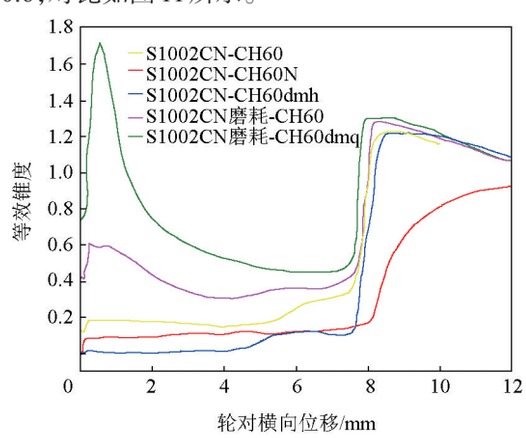


图11　踏面磨耗前后与不同轨廓匹配的等效锥度对比

Fig. 11　Equivalent conicity of tread wear before and after with different rail type

基于大量线路轨廓型状调查的基础上，适应中国线路条件的踏面设计[1]，通过动力学仿真分析确定工作区域锥度特性，常工作区应保证列车具有足够的安全性、舒适性，高、低锥度区域在确保在线路参数公差范围内轮轨匹配等效锥度变化较小，同时又满足列车曲线通过时具有足够的径向功能（见图 12）。

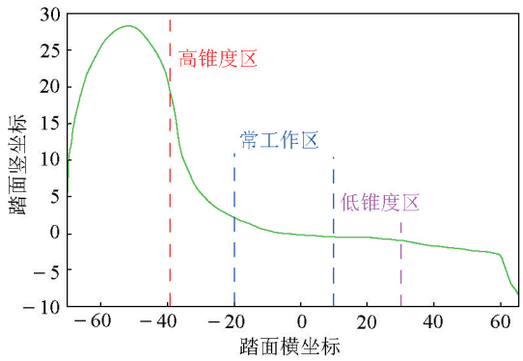


图 12　踏面设计示意图

Fig. 12　Tread design map

3.2　动力学性能计算

动力学性能计算一般包括临界速度、运行稳定性、曲线通过性能、平稳性和舒适性计算等，分析模型一般将构架、车体看作刚性体，通过悬挂元件连接。随着动车组运行速度的提高，悬挂部件的非线性特性，构架、车体的弹性振动、车下吊挂部件的悬挂模态对车辆动力学性能均有较大影响，简单依靠动力学计算确定最优悬挂参数，并进行转向架的设计已不能满足高速动车组转向架工程应用要求，目前动力学计算需将悬挂元件参数动态特性参数带入动力学模型，线路、台架试验测试了定位节点、抗蛇行减振器等部件的动态特性，需要考虑构架、车体的弹性振动，为确保关键部件故障状态下车辆的安全性，还需要考虑关键部件失效状态下车辆的安全性，车线耦合系统动力学分析如图 13 所示。由于高速铁路曲线半径均较大，曲线通过性能均较好，下面从临界速度、运行稳定性、平稳性和舒适性三个方面分析影响动力学性能的参数。

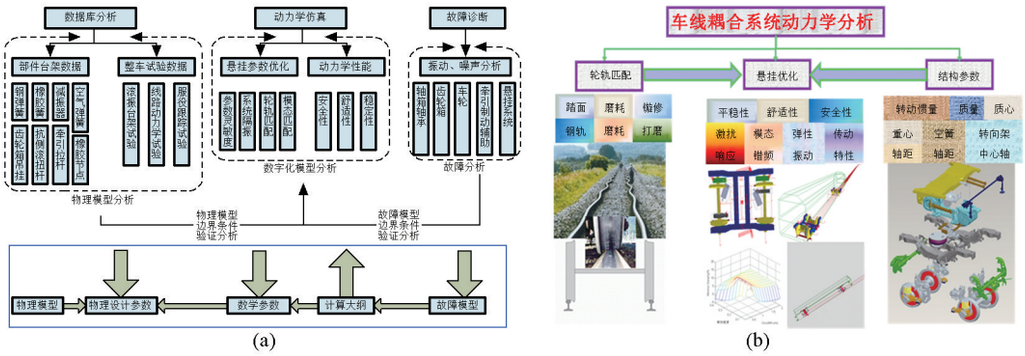


图 13　车辆系统动力学分析流程

Fig. 13　Vehicle dynamics system analysis process

3.2.1　临界速度分析

为保证高速动车组运行速度要求，必须有足够大的临界速度，转向架哪些悬挂和质量参数对临界速度影响最大，首先进行灵敏度分析，以目前已投入运营某动车组为例，通过灵敏度分析发现抗蛇行减振器动态刚度及阻尼、车体质量变化对车辆临界速度影响较大，在车辆设计过程中应着重控制车体质量、抗蛇行减振器动态特性参数。

图 14 为悬挂参数对临界速度影响分析，图 15 为质量参数对临界速度影响分析。

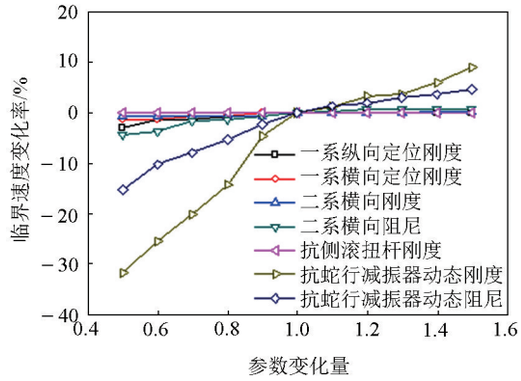


图 14　悬挂参数对临界速度影响分析

Fig. 14　Suspension parameters analysis of critical velocity effect

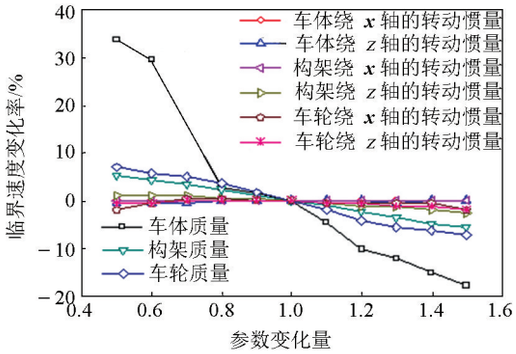


图 15　质量参数对临界速度影响分析

Fig. 15　Mass parameters analysis of critical velocity effect

3.2.2　运行稳定性分析

仍以投入运营某动车组为例，通过灵敏度分析、踏面等效锥度、一系定位节点刚度、抗蛇行减振器参数对车辆运行稳定性影响最大。对比分析发现，等效锥度较低锥度时，抗蛇行减振器等效刚度越大，转臂纵向刚度的可选择范围越小；等效锥度较高时，抗蛇行减振器等效刚度越大，稳定性越好，转臂纵向刚度的可选择范围越大，如图16所示[2,3]。

3.2.3　平稳性和舒适性分析

中国幅员辽阔，动车组在长距离运行时，尽量提高乘坐舒适性，降低旅客乘坐疲劳感就显得尤为重要了，是与其他交通工具竞争的关键，为了抓住问题的主要矛盾，采用上述相同的动车组参数模型，首先建立多体动力学模型，分析了系统悬挂参数、质量参数、轮轨参数对旅客横向乘坐舒适度的敏感程度，抗蛇行减振器动态特性、轮轨匹配等效锥度、车辆系统参数对平稳性、舒适性指标影响较大（见图17）。

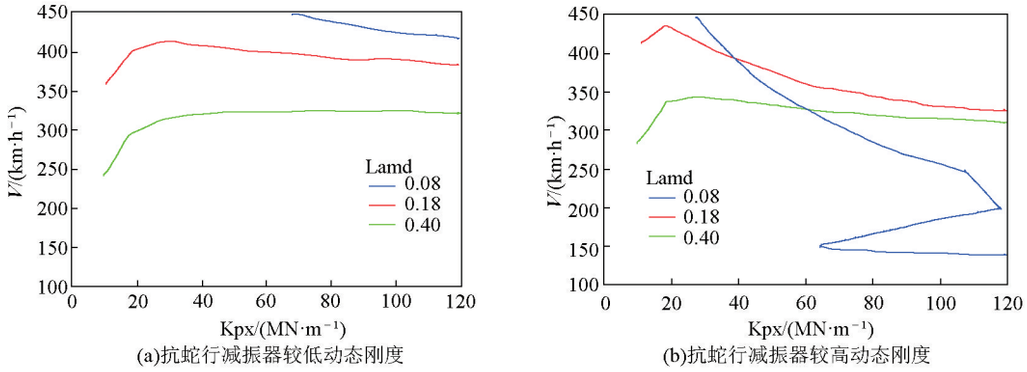


图 16　不同等效锥度下定位节点刚度对临界速度的影响

Fig. 16　Analysis of the guidance node stiffness effect on the critical speed under different equivalent conicity

注：Kpx 为每轴箱纵向定位刚度；Lamd 为等效锥度

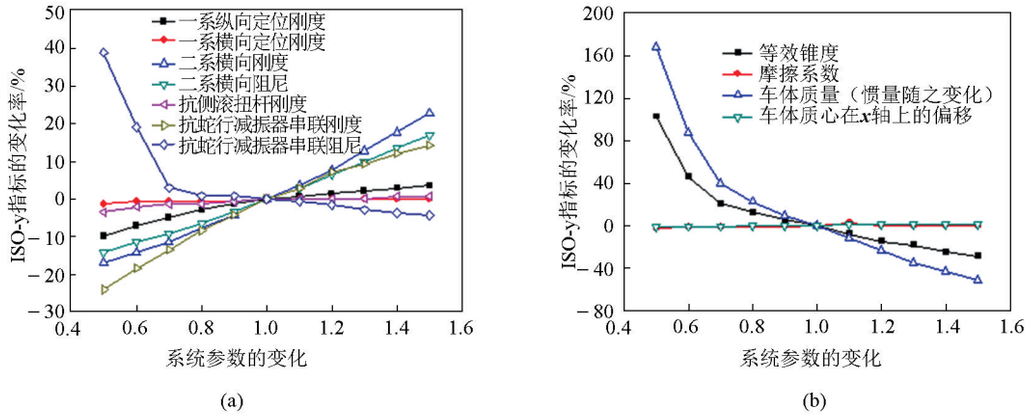


图 17　车辆系统参数对平稳性、舒适性的影响分析

Fig. 17　Analysis the impact of vehicle parameters on system stationarity and comfort

车辆设计及悬挂参数设计中应通过部件台架特性试验、整车滚振试验、线路动力学试验等手段

对关键参数进行多方比对，选出最优参数。

4 构架结构可靠性研究

构架是转向架的主体结构，一般均采用钢板焊接结构，设计使用寿命30年。构架各个部位承受各种不同的疲劳载荷（见图18），构架的失效主要是焊缝处疲劳失效。

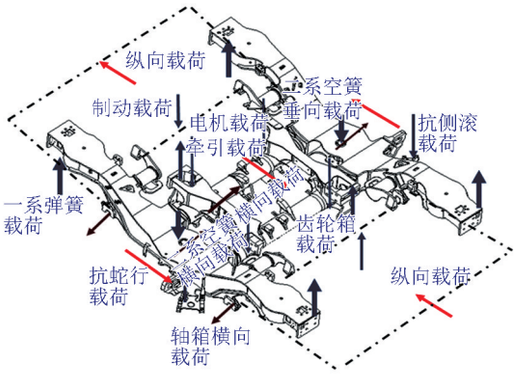


图18 构架承受载荷情况

Fig. 18 Bogie frame loading force

在研发阶段进行有限元结构分析，确定最优结构形式，构架试制完成后一般通过台架疲劳试验方法来验证评估构架设计寿命。目前，在进行机车车辆结构的疲劳寿命预测时，对载荷谱的确定一般采用以下3种方法。a. 实测数据：通过实际线路试验测试得到构件的动应力/应变，结合标定试验和载荷识别技术，统计分析得到需要的载荷谱；或将构件设计为力传感器，直接测试得到结构上的载荷；b. 估算数据：依据设计目标分析工况，结合线路和车辆设计经验对载荷谱进行估计，这种方法需要较强的经验积累；c. 动力学仿真：通过动力学仿真，结合部分试验数据，获得各种工况下的应力—时间历程，通过载荷应力传递关系，获得载荷谱，上述3种方法中，以实测数据的准确度最高[3]。在引进动车组和动车组服役跟踪试验之前，通常采用UIC标准中提出载荷谱作为设计和试验依据，但由于UIC标准和国外疲劳试验用载荷谱主要是基于欧洲的线路及运用情况提出的，由于我国线路条件与国外的差异性及不同线路之间的差异性，实际获得的载荷谱与既有相比存在很大差异，有时会出现设计及台架验证阶段寿命满足设计任务书要求，但在运营过程中却提前出现了局部开裂等问题，因此，能够确定构架各部位载荷形式，在设计时采用有限元方法和台架疲劳试验准确把握构架的疲劳寿命是必要的，载荷谱的研究是高速转向架结构可靠性研究的核心和基础。

中国高速铁路投入运用以来，对运行动车组进行的持续跟踪试验，测试覆盖了京沪、京广、哈大高铁线路，掌握了高寒、高温等不同气候条线下2×10^6 km的转向架结构应力随车轮踏面磨耗、运行里程的变化趋势，如图19所示，比较全面准确的掌握了构架疲劳损伤较大部位，在对跟踪试验数据系统统计分析的基础上，根据实际跟踪获得的构架上不同部位测点的全时域有效应力值，按1.5×10^7 km全寿命周期换算成等效应力；同一部位测点的等效应力值在不同线路跟踪结果是不同的，考虑到车辆运用线路的全覆盖，各测点均取最大等效应力值；将构架所受载荷分解为四个基本载荷系和四个辅助载荷系，其中基本载荷系为浮沉载荷系、侧滚载荷系、扭转载荷系和横向载荷系，辅助载荷系为牵引载荷系、电机载荷系、齿轮箱载荷系和制动载荷系，在具备各力系加载的疲劳试验台上按损伤一致性原则进行标定，从而获得载荷谱，如图20、图21所示。

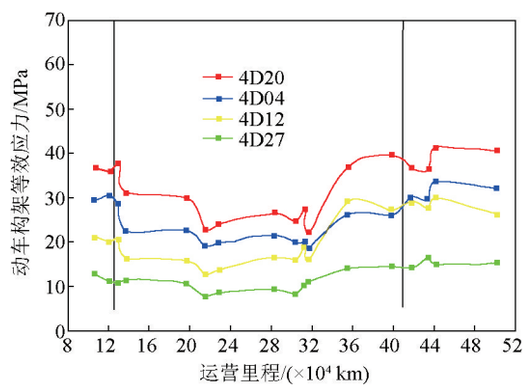


图19 构架各测点在运营中动应力变化趋势

Fig. 19 Dynamic stress variation trend of each bogie frame measuring point

以中国某既有动车组测试数据及载荷谱为例，表1给出了损伤一致性校准后由校准载荷谱计算得到的构架各测点损伤与实际损伤的比较。可见，校准后的载荷谱更为准确可靠，依据该方法可将国际上现行的处于定性层次的构架可靠性试验评定标准和设计规范提升至定量层次，为今后转向架构架的设计和试验提供更为准确的载荷依据。

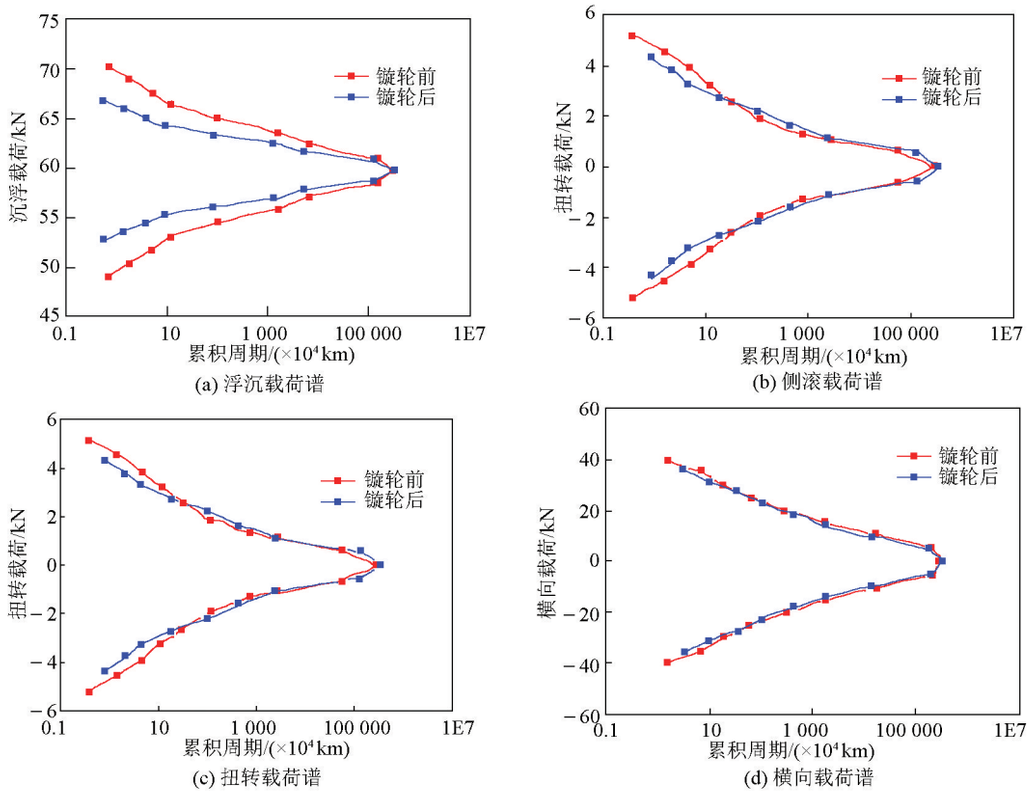


图 20　镟轮前后构架基本载荷系载荷谱比较

Fig. 20　Compare the bogie frame main load spectrum before and after turning wheels

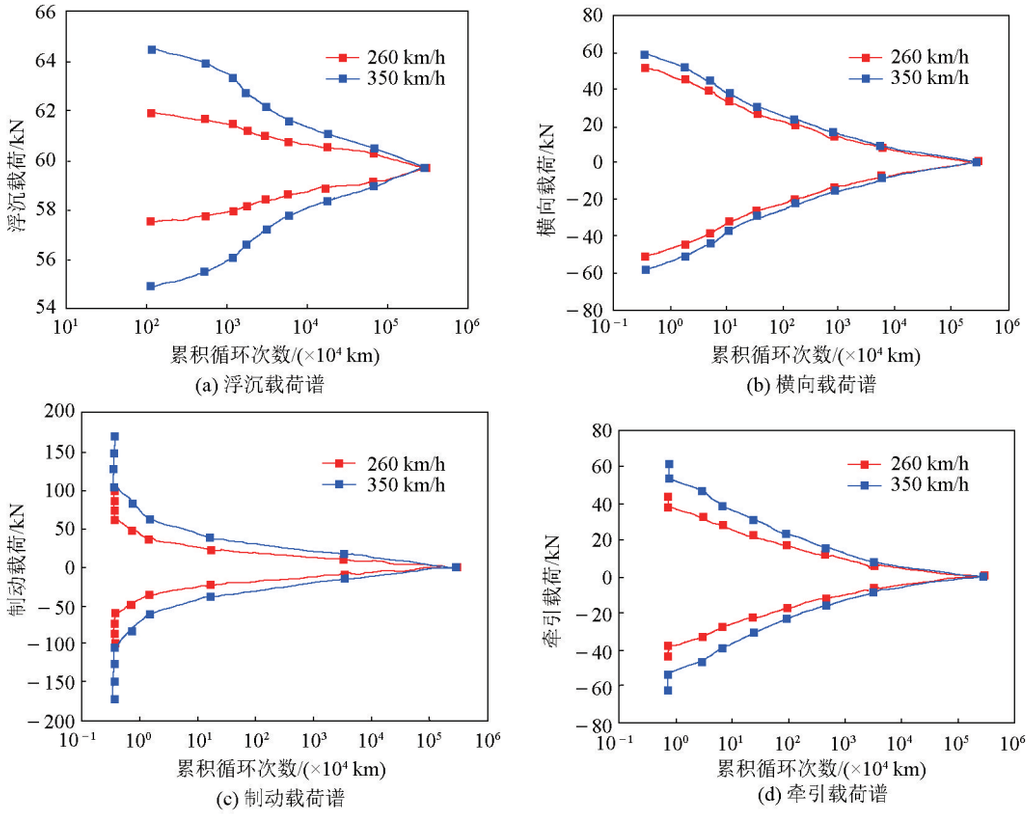


图 21　牵引载荷系和制动载荷系与列车运行速度的关系

Fig. 21　Traction load and braking load relationship with the train running speed

表1　构架各测点损伤值比较（$\times10^7$/C）

Table 1　Damage value of measuring points of each bogie frame（$\times10^7$/C）

测点	实际损伤	载荷谱系计算损伤	校准载荷谱系计算损伤
1	0.025	0.036	0.069
2	0.035	0.014	0.084
3	0.026	0.011	0.026
4	0.037	0.072	0.130
5	0.021	0.018	0.040
6	0.050	0.041	0.074
7	0.055	0.037	0.056
8	0.180	0.015	0.180
9	0.023	0.012	0.041

5　结语

中国高速动车组转向架设计不但要满足功能性需求，还必须具备足够可靠性、优秀的动力学性能，还要尽可能降低寿命周期内维护成本、易于维护。转向架悬挂元件非线性特性、部件模态均对整车动力学性能、结构强度具有较大影响，系统集成技术涉及材料、结构设计、疲劳可靠性、系统动力学、机电耦合等多学科及交叉学科。从引进技术到自主开发7年时间，动车组转向架设计从照搬国外图纸、技术条件到台架、线路试验摸索，正逐步建立中国标准的技术体系，转向架涉及的结构可靠性、动力学参数优化等取得了阶段性的成果，但在轮轨接触、振动降噪、寿命评估等技术与国外还存在一定的差距，还需进一步深化研究。

参考文献

[1]　池茂如. CRH3动车组踏面改良设计报告[R]. 成都：西南交通大学，2014.

[2]　罗　仁. 标准动车组S1002CN踏面动力学性能计算报告[R]. 成都：西南交通大学，2014.

[3]　毛　贺. 高速列车载荷谱编制方法的研究[D]. 北京：北京交通大学，2009.

High-speed train bogie technology research

Zhao Minghua, Liang Shulin, Song Chunyuan

(Research & Development Center, Changchun Railway Vehicles Co. Ltd., Changchun 130062, China)

[**Abstract**]　High-speed railway propose higher requirements on the bogie technology, in order to design a super performance of electric multiple unit (EMU) bogie, investigate the line condition of China passenger dedicated railway, and also investigate the wheel tread wear of EMU, use actual measurement rail profile and worn profile tread analysis the matching relationship of wheel and rail. Dynamics analysis consider nonlinear characteristics of box guidance node, anti-hunting damper, air spring and other parts, and consider the parameters changes at different high and low temperature variations, also consider motor elastic suspension mode, basic on above factor, build vehicle dynamics model with actual wheel rail matching relationship, through system simulation optimal selection of suspension parameters, combined with the test stand construction design. In order to grasp the key parts of bogie service period reliability, take a great deal dynamic stress test, use the test data analysis maintenance vehicle operating cycle, different climatic conditions, different line conditions on the ballastless track of China, setup China high-speed train load spectrum. Through system integration of the structure design, suspension, transmission, brake, wheel rail noise, structure welding and so on, the high-speed train bogie technology system was founded.

[**Key words**]　high-speed train; wheel/rail relationship; system dyanmics; load spectrum; structural optimization